

PCB 납땜 검사를 위한 X선 단층 영상 시스템의 해석 및 설계

The Analysis and Design of X-ray Cross Sectional Imaging System for PCB Solder Joint Inspection

노영준, 강성택*, 조형석*, 김형철**, 김성권**

*한국과학기술원 기계공학과 (Tel : 042-869-3253; Fax : 869-3210; E-mail : aronld@lca.kaist.ac.kr)

**삼성전자 생산기술센터(Tel : 0331-200-2466; Fax : 200-2467; E-mail : hckim@srtf.sec.samsung.co.kr)

Abstracts The more integrated and smaller SMD are needed, new solder joints packaging technologies are developed in these days such as BGA(Ball Grid Array), Flip Chip, J-lead etc. But, it's unable to inspect solder joints in those devices by visual inspection methods, because they are hid by it's packages. To inspect those new SMD packages, an X-ray system for acquiring a cross-sectional image of a arbitrary plane is necessary. In this paper, an analysis for designing X-ray cross sectional imaging system is presented including the way for correcting the distortion of image intensifier. And we show computer simulation of that system with a simple PCB model to show it's usefulness in applying PCB solder joint inspection.

Keywords X-ray, laminography, Cross Sectional Image, PCB Inspection

1. 서론

최근들어 전기 기기의 소형화, 경량화, 다기능화에 따라 실장효율의 극대화를 요구하게 되었으며 이를 위한 고속 실장 기술 개발이 다방면으로 진행중이다.[4] 이에 따라 기술의 핵심인 전자회로 기판은 점차 미세화, 고밀도화로 개발되고 있으며, 기판의 고밀도화 요구에 따라 전자 부품의 소형화 뿐만 아니라 BGA(Ball Grid Array), FCA(Flip Chip Array)등 새로운 형태의 접합 기술이 등장하게 되었다. 그러나, 이들 부품은 실장 부위가 칩의 안쪽에 붙어있기 때문에 기존의 외관 검사방식으로는 납땜 부위의 검사가 불가능하므로 신뢰성 있는 새로운 검사 시스템이 필요하다.[2] 현재 실장된 기판의 자동검사에는 비전을 이용한 검사, 레이저를 이용한 검사, 셔모그램을 이용한 검사, 그리고 X선을 이용한 검사 방법이 있다. 이중 비전이나 레이저를 이용한 검사 방법은 근본적으로 외형 검사이므로 육안으로 볼 수 없는 부분에 대한 검사는 불가능하며 따라서 납땜부 내부검사, 힐필렛 검사, 다층 기판 검사에 적용할수 없다. 이에 반해 셔모그램과 X선에 의한 방법은 내부 검사가 가능한 방법이다. X선을 이용한 검사 방법은 기본적으로 X선의 투과 성질, 즉 피투과 물체의 두께와 밀도에 반비례하는 투과 X선 강도에 의한 영상 형성을 이용한 것으로 내부 결함을 검사할수있다. 그러나, 최근 표면 실장에 사용되는 부품들은 리드의 영향이 크므로 기존의 X선 투과 영상으로 검사하기 어려우며, 특히 얇은 기판의 경우 양쪽의 납땜 부위가 겹치게 되므로 납땜부의 정확한 형상을 알기가 어렵다. 따라서 이들 부품의 검사를 가능하게 하기 위해서는 의료분야에서 사용되고있는 단층 영상 기법을 이용하여 임의의 한 단면을 검사할 수 있는 검사시스템이 필요

하다. 단층 영상은 투과 각도를 달리하여 얻은 각 영상들을 합성하여 하나의 단층 영상을 구하는 방식으로 토모그래피(Tomography), 라미노그래피(Laminography), 디지털 합성법(Digital Tomosynthesis)등의 방법이 사용되고있다. X선을 이용한 PCB 단층 검사 장치로는 기계적으로 영상을 중첩시키는 라미노그래피 방식과 소프트웨어적으로 합성하는 디지털 영상 합성법이있다.[1][2] 본 연구에서는 디지털 영상 합성법의 원리로 단층 시스템을 구성하고자 하며, 시스템은 회전 X선원, 대형 영상 증배관, 고밀도 CCD 카메라로 구성된다. 시스템의 설계를 위해 각 요소품들을 해석, 모델링 하였으며 이들 요소간의 조건에 따른 설계 변수의 범위를 제시한다. 단층 영상 평가를 위해 단층의 특징을 나타낼수 있는 대상으로 구형의 물체를 선정하여 설계 변수에 따른 단층 영상의 영향을 파악하고 비교한다.

2. X선을 이용한 PCB 납땜 검사

2.1. X선의 특성

X선은 어떤 물질을 투과함에 따라 지수적으로 감쇄 된다. 이때 X선의 감쇄는 X선의 강도와 대상물질의 물성치, 투과된 거리에따라 결정되는데 이는 다음 X선의 감쇄식으로 표현 된다.(1) 감쇄식은 X선 감쇄계수가 μ 인 물질을 입사 X선 강도 I_0 로 x 만큼의 두께를 통과한후의 X선 강도 I 를 나타내는 식이다.

$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x} \quad (1)$$

위의 식에서 I 는 물체를 투과한 후의 X선 강도이며, I_0 는 입사 X선 강도, μ 는 선형 감약 계수, x 는 X선이 투과한 물체의 두

계이다. μ/ρ 는 질량당 흡수 계수로 물질의 상태와 무관하며 전자량이 큰 물체일수록 큰 값을 갖는다. 동일한 X선에 대하여 선형 감쇄 계수 μ 는 밀도가 큰 물질일수록 크다.[4][6] 일반적으로 납땀부는 주로 밀도가 큰 납(Pb)로 구성되어 있으므로 구리가 주성분인 리드부보다 X선의 감쇄 효과가 크므로 납땀 검사에 적합하다.

22. 기본적인 X선 영상 획득 시스템

기본적인 X선 영상 획득 시스템은 다음 그림과 같이 X선 발생장치인 X선 튜브, 투과 X선의 강도를 검출하여 가시 광선 화해주는 영상 증배관, 영상증배관에 맺힌 영상을 데이터 어레이로 받아들이는 CCD 카메라로 구성되며, X선원과 영상증배관 사이에 검사할 대상 물체가 놓이게 되는 X-Y 테이블이 놓이게 된다. X선 영상의 배율은 점광원인 X선과 대상 물체간의 거리를 조절함에 따른 기하학적 관계에 의해 결정된다. 즉, 대상 물체를 X선원 가까이 가져감으로써 확대된 영상, 멀리함에 따라 축소된 영상을 얻게된다.

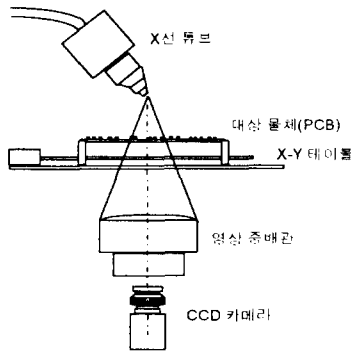


그림 1. X선 영상 획득 시스템
Fig. 1. X-ray imaging system

2.3. X선 단층 영상 획득의 원리

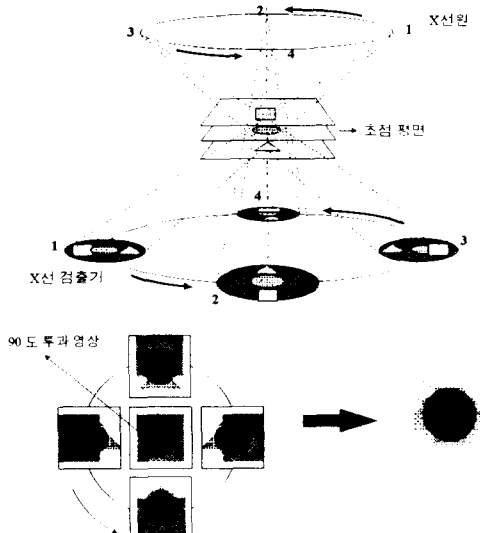


그림 2. 단층 영상 획득 원리
Fig. 2. Principle of acquiring cross-sectional image

단층 방식의 원리는 서로 다른 투과 각도에서 얻은 X선 투과 영상들을 합성하여 원하는 단면(초점 평면)의 영상을 추출하는 영상 획득 방식이다. 그림과 같이 기하학적 관계로 한개의 초점평면이 정해지며, 이때 투과 각도에 상관 없이 초점 평면의 형상은 동일한 위치에 상이 맺히게 되어 보존된다. 반면, 초

점평면 위나 아래 평면의 형상은 서로 다른 위치에 상이 맺히므로 이들 영상을 중첩시키면 흐려지게 되어 초점 평면의 영상만을 선명하게 구하게 된다.

3. 단층 영상 시스템 해석 및 모델링

3.1. 시스템 개요

다음은 개발하고자 하는 단층 검사 시스템의 개략도이다. X선 튜브는 일정 범위내에서 X선을 전기적으로 회전시킬수 있는 특수 X선 튜브를 사용하며 PCB를 투과한 X선을 검출하는 장치로는 큰 입력면을 갖는 영상 증배관을 사용하여 여러각도의 투사 영상을 얻을수 있도록 사용한다. 즉, 어느 한 투과 각도에 의한 초점 평면상의 검사영역은 영상 증배관의 일부에 맺히게 된다. 이렇게 함으로써 검출기의 위치 이동을 위한 기구적 움직임 없이 다각도 X선 투과 영상을 구할수있을 뿐만 아니라, 영상증배관의 임의의 위치를 검출기로 사용할수 있으므로 배율의 변화가 유동적이고, 투과식 검사방법도 동시에 적용할 수있게 된다.

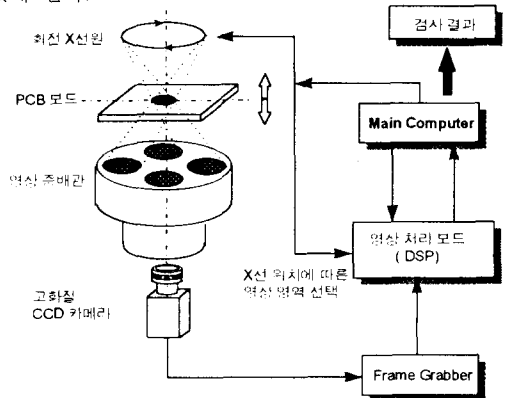
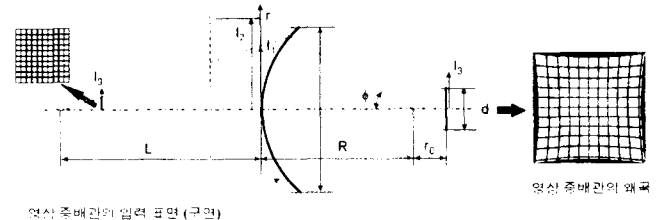


그림 3. X선 단층 영상 시스템
Fig. 3. X-ray cross-sectional imaging system

3.2. 영상 증배관의 왜곡 모델

3.2.1. 영상 증배관의 구면에 의한 영상 왜곡 모델링

X선이 점광원인 경우 영상 증배관의 입력면이 구면이기 때문에 생기게 되는 편구선 왜곡이 생기게 된다. 그림에서 10는 영상 증배관의 표면 r에 11으로 입사되나, 영상 증배관의 구면에 의해 12의 위치로 왜곡이 일어나게 되고 12는 축소되어 영상 증배관의 출력면에 13로 맺히게 된다. 이것이 영상 증배관의 편구선 왜곡의 원리이며, 이때 11과 12 사이에는 왜곡계수 K에 의한 관계식이 성립한다.(2) 그림에서 격자의 영상증배관의 왜곡에 의한 투과 영상을 보여주는데, 영상 증배관의 중심에서부터 멀수록 형상은 더 크게 퍼진 상이 얻어짐을 알수있다.



영상 증배관의 입력 표면(구면)

영상 증배관의 왜곡

$$I_1 = m \cdot I_0 \quad I_2 = \kappa \cdot I_1 \quad I_3 = \frac{R}{r_0} I_2$$

$$\kappa = \frac{L + R(1 - \cos \phi)}{L \cdot \cos \phi} \quad m \text{ 배율} \quad (2)$$

그림 4. 영상 증배관의 왜곡 모델

Fig. 4. Model for distortion of image intensifier

3.2.2. 회전 X선원에 대한 영상 증배관의 왜곡

그림과 같이 X선원이 반경 R_s 로 회전하며 PCB를 투사할때 영상 증배관의 왜곡은 X선원의 위치에 따라 영상 증배관의 입력면에 투사되는 각도가 달라지므로 3.2.1.의 왜곡모델보다 복잡하며 보다 일반적이다. 입력면상의 점 P2에는 투사선 $S_x P2$ 가 투과하는 물체에 의해 감쇄된 X선이 입사되며, 점 P2는 영상 증배관의 왜곡 모델에 의해 출력면 S_{out} 에 맺히게 된다. 이때의 출력면의 점 S_{out} 과 입력면의 점 P2간의 관계는 다음 식 (3),(4)로 표현되는 좌표 변환을 따른다. 이 식을 이용하면 영상 증배관의 출력면에 맺히는 왜곡된 영상의 보정이 가능하다.

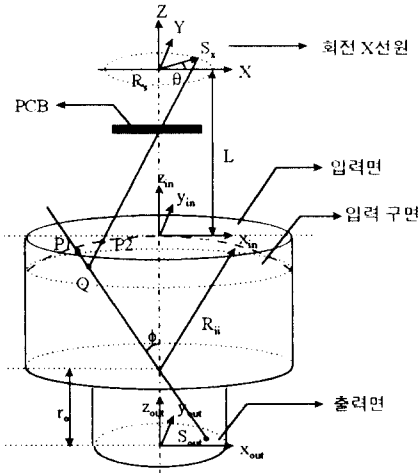


그림 5. 단층 시스템에서의 영상 증배관의 왜곡과 좌표 변환

Fig. 5. Distortion of image intensifier in laminography system and Coordinate transform in image intensifier.

$$P1 = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = -m \cdot S_{out} = -\frac{R_{ii}}{R_s} \begin{bmatrix} x_{out} \\ y_{out} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P2 = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} P1 \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \frac{1}{L + R_s(1 - \cos \theta)} \begin{bmatrix} L \cos \theta & 0 & R_s R_{ii}(1 - \cos \theta) & 0 \\ 0 & L \cos \theta & 0 & R_s R_{ii}(1 - \cos \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2.3. 영상 증배관의 구면에 의한 광량 왜곡

영상 증배관의 구면은 표면에 맺히는 상의 형상을 왜곡시킬 뿐 아니라 입사각도의 차이에 의한 광량 또한 왜곡시킨다. 영상 왜곡에서와 마찬가지로 광량 왜곡 또한 영상 증배관의 가장자리로 갈수록 심해진다. 광량 왜곡은 입사되는 면의 수직 방향과의 이루는 각의 cosine 값으로 간단히 모델 할수 있으며 그림 5에서 S_{out} 과 P1이 이루는 직선과 Q와 S_x 가 이루는 직선간의 방향 cosine 값이 되고, 역으로 영상 증배관의 출력면에 맺히는 광량을 cosine 값으로 나누어 주어 왜곡된 광량을 보정한다.(5)

$$\Phi' = \frac{1}{\cos \phi} \Phi \quad \cos \phi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{n}}{|\vec{a}| |\vec{n}|} \quad (5)$$

$$\vec{a} = (S_x - \cos \phi \cdot x, S_y - \cos \phi \cdot y, L + R_{ii}(1 - \cos \phi)) \quad \vec{n} = (x, y, R_{ii})$$

3.3. 투사 각도에 따른 단층 영상

라미노그래피에 의한 실제 단층 영상에서는 초점 평면 밖의 물체의 영향에 의해 실제 단층 형상을 제대로 구하지 못하는 경우가 생길수 있는데 이 영향을 줄여야 좋은 단층 영상을 구할수 있게된다. 초점 평면 밖의 물체가 단층 영상에 미치는 영향은 그 물체의 형상에 따라 다르게 나타나지만 구형의 물체에 대하여 투사 각과 단층 영상의 관계는 다음 그림 6과 같다. 즉

투사각이 클수록 실제와 가까운 단층 영상을 구할 수 있음을 알수 있다. 초점 평면으로부터 동일한 거리에 떨어진 물체에 대하여 투사각이 클수록 영상증배관에 맺히는 위치의 차이가 커지게 되므로 결과적으로 중첩에 의한 효과는 적어지게 된다. 따라서, 일반적으로 깨끗한 X선 단층 영상을 구하기 위해서는 초점 밖의 물체에 의한 영향이 적어지도록 X선의 투사각이 커야한다. PCB 부품중 BGA의 경우는 구형의 리드 아래 납땀부가 있으므로, 이경우 납땀부의 단층 영상을 얻기 위해서는 투과각이 커야만 검사가 가능하다.

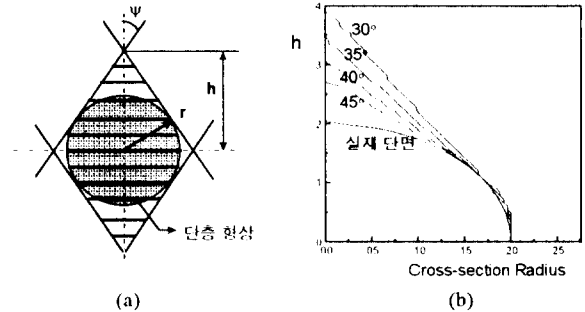


그림 6. 초점 평면 밖의 물체에 의한 효과 (a)초점 평면에 따른 구형 물체의 단층 지름 (b)투과 각도에 따른 단층 검출 성능

Fig. 6. Contributions of out-of-planes material (a) diameters of cross-sectional shape of a sphere at various levels of focus (b) ability of aquring cross section image with respect to view angle

3.4. 시스템의 기하학적 구속 조건

단층 검사 시스템에서는 회전 X선원과, 대상 물체까지의 거리, 검출기의 위치 등에 의하여 초점 평면이 기하학적으로 정해지기 때문에 투과식 검사장치처럼 배율을 임의로 조절하는것이 쉽지않다. 특히나 검출기인 영상 증배관은 그 크기가 제한되어있고, 무게가 크므로 위치의 이동이 자유롭지 못하다. 따라서 X선원의 회전반경과 대상물체까지의 거리가 검사에 적합한 배율과 투사각들을 구현하도록 알맞게 선정되어야 한다. 그러나, 이들 설계 변수들은 서로 연관되어 있어 최적의 해를 찾기란 쉽지 않다. 즉, 투사각도를 크게 하는것이 단층 검사의 성능을 높일수 있으나, 영상 증배관의 크기에 제한있으므로 배율을 크게 할수 없으며 효과를 가져오며, 또한 영상 증배관의 구면에 의한 왜곡이 심해지는 단점이 있다. 다음 식은 배율 m과 회전 X선원의 반경 R_s 에 의해 결정되는 X선원과 초점 평면간의 거리 Lo 에 대한 관계식이다.(6) 투과 각도는 Lo 와 R_s 에 의해 결정이 되므로 Lo_{min} 은 주어진 조건에서 구현할수 있는 최대의 투과 각을 의미한다.

$$Lo_{min} = \frac{(R_s + R_o)R_{ii}(1 - \cos \phi_{max})}{R_{ii} \sin \phi_{max} + R_s - m(R_o + R_s)} \quad (6)$$

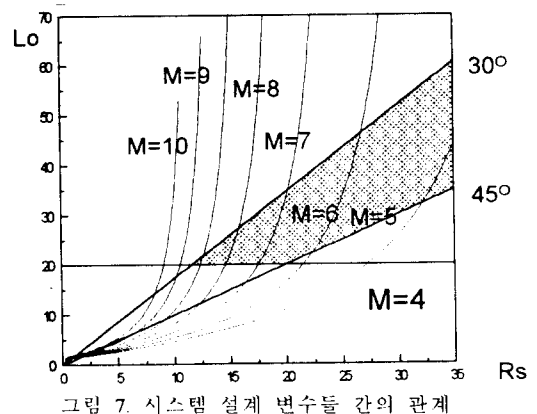


그림 7. 시스템 설계 변수들 간의 관계

Fig. 7. Relations between the design variables of the system

그림 7은 윗 식에 의해 회전 X선원 반경과, 대상물체까지의 거리, 배율등의 관계를 도시한 그림이다. 회전 X선 반경은 기술적 수준의 한계로 35mm 이하가 되어야 하며, X선원과 대상 물체까지의 거리는 PCB 부품의 높이에 의해 제약이 있으므로 최소한 20mm을 넘어야 한다. 이 조건들과 함께, 투과 각도는 단층의 효과를 높이기 위해 30도 이상 45도 이하로 설정하고 각 변수의 설정 영역을 도시하면 다음 그림 7의 빗금친 영역과 같다.

4. 시뮬레이션

4.1. 모의 실험 조건

위의 설계조건으로 영상 증배관 지름 310mm 사용에 FOV 10 mm x 10 mm, 배율 6 배의 조건을 만족시키는 회전 X선의 반경은 20 mm로 X선원과 초점 평면 사이 거리는 35 mm로 선정하여 단층 시스템을 모의 실험 하였다. 이때의 투과각은 29.7° 이다.

4.2. PCB 모델 및 시뮬레이션

라미노그래피 시스템의 성능을 알아보기 위해 다음 그림 8과 같이 Gull Wing 형의 부품을 모델하였다. 리드부의 두께는 0.5mm, 납땜 부위는 0.3mm, 필렛은 0.6mm로 단순화 시켜서 모델하였으며 선 감약 계수는 납 부분이 리드부보다 4 배 큰 값으로 선정하여 시뮬레이션을 하였다 (a)(b). 영상 (c)는 Gull Wing 형 부품이 윗면에, 아랫면에 또다른 납땜부가 있는 경우의 투과 영상이며, 이 경우 리드의 영향과 양면의 납땜부가 겹쳐서 납땜부의 검사가 어렵게 된다. (d)와 (e) 영상은 이러한 양면 PCB의 경우 각각 윗면, 아랫면에 대한 단층 영상을 구한 것으로 리드부와 다른면의 납땜부의 영향을 줄여서 납땜부의 형상을 강조한 영상이 얻어짐을 알수있다. (d)에서는 두번째 납땜부가 영상에 나타나지 않는데 이는 미납으로 납땜이 이루어지지 않은 경우를 모델한 것으로 투과식으로 얻은 영상에 비해 납땜의 상태를 알아보기 쉬움을 알수있다..

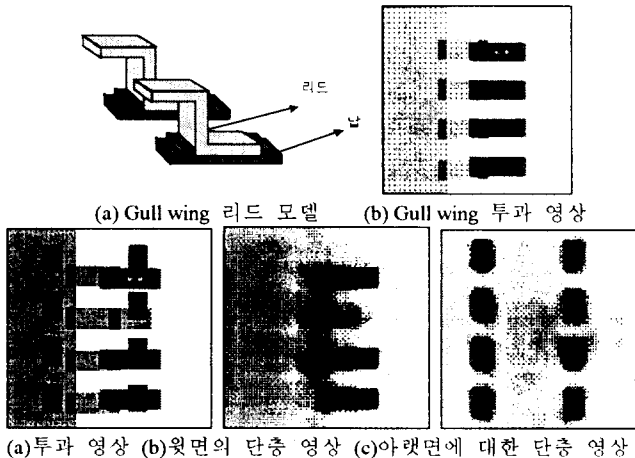


그림 8. 양면 PCB의 투과 및 단층 영상
Fig. 8. X-ray image of double sided PCB and it's cross-sectional image

5. 결론

PCB의 X선 단층 영상을 구하기 위한 검사 시스템을 그림 3과 같이 구성했으며, 이 시스템의 설계를 위한 기하학적 해석을 하였다. 한개의 영상 증배관으로 여러 각도의 영상을 얻기 위해 큰 영상 증배관을 사용하였으며 이로 인해 생기는 영상의

형상왜곡과 광량 왜곡을 모델하고 역으로 왜곡의 보정식을 제시하였다. 라미노그래피 방식의 단층 검사에서 문제시되는 초점 평면 밖의 물체에 대한 영향을 평가하기 위해 구형의 얇은 막을 대상으로 선정하여 각도에 대하여 단층 영상의 검출 영역을 구했을때 투과 각이 클수록 실제 단층 형상에 가까운 단층 영상을 얻을 수 있음을 보였다. 영상 증배관을 사용함에 따라 제한되는 투과각과 회전 X선원의 반경, 배율에 대한 관계식을 세웠으며 이를 통해 주어진 설계 사양에 맞는 기하학적 조건을 구할수 있다. PCB 부품을 모사한 대상에 대한 시뮬레이션을 하였으며 이를 통해 투과식 X선 영상에서는 리드부와 PCB의 반대쪽 면의 부품 영향으로 검사하기 어려운 납땜부의 형상을 단층 영상으로 원하는 단면의 납땜부 형상을 얻을수 있음을 보였다.

후기

이 논문은 1996년도 삼성 전자의 프로젝트 'X선을 이용한 납땜 검사 장치 개발' 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계 제위께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] John Adams, "X-ray Laminography Analysis of Ultra Fine pitch Solder Connections on Ultra-thin Boards", Integrated Circuit Metrology, Inspection, and and Process Control V (SPIE) Vol.1464. 1991. pp 484-497
- [2] Emmett F. Kaelble, "Handbook of X-rays", McGraw Hill, New York pp 1-31
- [3] S.M. Rooks, B.Benhabib, K.C. Smith, "Development of an Inspection Process for Ball-Grid-Array Technology Using Scanned Beam X-ray Laminography", IEEE trans. on Components, Packing, and Manufacturing Technology - Part A. Vol. 18, No 4, December 1995. pp 851-861.
- [4] Y.K. Ryu and H.S. Cho, "Visual inspection scheme for use in optical solder joint inspection system", IEEE ICRA '96, Minnesota, USA, 1996
- [5] Thomas A. Siewert, Mark W. Austin, "Evaluation and Qualification Standards for an X-ray Laminography System" Materials Evaluation, Sept. 1992, pp 1027-1035.
- [6] Thomas A. Siewert, Mark W. Austin, "The contributions of Out-of-Plane Materials to a Scanned-Beam Laminography Image" Materials Evaluation, Oct. 1994, pp 1194-1198.
- [7] 김경애, 이충현, "방사선 투과 검사", 세진사, 서울, 1996. Pp 123-130